

Научная статья
УДК 631.51
EDN ZZAPXF
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.10

Использование фрактальных методов для оценки структуры почв после создания противопожарных минерализованных полос

Илья Викторович Цветков¹

доктор технических наук

Вадим Вячеславович Кульнев²

кандидат географических наук

Михаил Владимирович Кумани³

доктор сельскохозяйственных наук

Андрей Николаевич Насонов⁴

кандидат технических наук

Хожиақбар Мохаммедаминович

Абдуҷаббаров⁵

Олег Викторович Трегубов⁶

кандидат сельскохозяйственных наук

Вячеслав Андреевич Похваленко⁷

Владимир Геннадьевич Ухтомский⁸

Аннотация. Представлена новая методика оценки качества механической обработки почв и подстилающих пород, основанная на измерении фрактальных характеристик изображений их срезов. Методику предлагается использовать для повышения эффективности механической обработки субстрата при организации противопожарных минерализованных полос. При этом обосновывается применение фрактальных методов для оценки изменения структуры субстрата, возникающего вследствие внешнего воздействия, которое в данном случае осуществляется плужным каналокопателем при различных углах наклона режущей пластины и скоростях его перемещения в толще грунта. Планирование эксперимента и обработка его результатов проводились на основе предположения о том, что как почвы, так и грунты зоны аэрации представляют собой неоднородную диссипативную систему с самоорганизованной критичностью состояний, которые закономерно изменяются в процессе внешнего воздействия на субстрат. При этом наблюдается эффект самоорганизованной критичности диссипативной системы, отличительным признаком которого является проявление самоподобия составляющих ее элементов. То есть в основе описываемого метода лежит изучение масштабной инвариантности структурных элементов грунта в процессе внешнего механического воздействия. На основе предложенной методики разработаны оптимальные режимы работы специального оборудования и механизмов для среднесуглинистых тёмно-серых лесных почв.

Ключевые слова: фрактальная размерность, противопожарные минерализованные полосы, структурные характеристики почв, фрактальная кривая Коха, динамические модели.

Для цитирования: Цветков И.В., Кульнев В.В., Кумани М.В., Насонов А.Н., Абдуҷаббаров Х.М., Трегубов О.В., Похваленко В.А., Ухтомский В.Г. Использование фрактальных методов для оценки структуры почв после создания противопожарных минерализованных полос. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2024. № 3. 121–130. С. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.10. <https://elibrary.ru/zzapxf>.

¹ Тверской государственный университет, профессор (Тверь, Российская Федерация), mancu@mail.ru

² Центральное-Черноземное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, ведущий специалист эксперт отдела государственного экологического надзора по Воронежской области (Воронеж, Российская Федерация), kulneff.vadim@yandex.ru

³ Курский государственный университет, кафедра географии, профессор (Курск, Российская Федерация), kumanim@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра управления недвижимостью и развитием территорий, доцент (Москва, Российская Федерация), adn22@yandex.ru

⁵ Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, аспирант (Москва, Российская Федерация), akbi@mail.ru

⁶ Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, начальник отдела биоразнообразия, лесопользования и лесовыращивания (Воронеж, Российская Федерация), o.v.tregubov@gmail.com

⁷ Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, аспирант (Воронеж, Российская Федерация), slavapohvalenko@yandex.ru

⁸ Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, лаборант-исследователь отдела лесной генетики и биотехнологии (Воронеж, Российская Федерация), greenland.ld@yandex.ru

Original article

EDN ZZAPXF

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.10

Using Fractal Methods to Assess Soil Structure after the Creation of Firebreaks

Ilya V. Tsvetkov¹

Doctor of Technical Science

Vadim V. Kulnev²

Candidate of Geographical Sciences

Mikhail V. Kuman³

Doctor of Agricultural Sciences

Andrey N. Nasonov⁴

Candidate of Technical Sciences

Khozhiakbar M. Abdujabbarov⁵

Oleg V. Tregubov⁶

Candidate of Agricultural Sciences

Vyacheslav A. Pokhvalenko⁷

Vladimir G. Ukhtomsky⁸

Annotation. This paper presents a new method for assessing the quality of mechanical processing of soils and underlying rocks based on measuring the fractal characteristics of their section images. The method is proposed to be used to improve the efficiency of mechanical processing of the substrate when organizing fire-prevention mineralized strips. At the same time, the use of fractal methods is substantiated for assessing changes in the structure of the substrate arising from external action, which, in this case, is carried out by a plow channel digger at different angles of inclination of the cutting plate and speeds of its movement in the soil thickness. The experiment was planned and its results were processed based on the assumption that both soils and aeration zone soils are a heterogeneous dissipative system with self-organized criticality of states that change regularly during external action on the substrate. In this case, the effect of self-organized criticality of the dissipative system is observed, the distinctive feature of which is the manifestation (self-similarity) of its constituent elements. That is, the described method is based on the study of the scale invariance of soil structural elements during external mechanical action. Based on the proposed methodology, optimal operating modes of special equipment and mechanisms for medium-loamy dark-gray forest soils have been developed.

Keywords: fractal dimension, fire-prevention mineralized strips, structural characteristics of soils, fractal Koch curve, dynamic models.

For citation: Tsvetkov I., Kulnev V., Kuman M., Nasonov A., Abdujabbarov K., Tregubov O., Pokhvalenko V., Ukhtomsky V. Using Fractal Methods to Assess Soil Structure after the Creation of Firebreaks. – Text : electronic // Forestry Information. 2024. № 3. P. 121–130. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.10. <https://elibrary.ru/zzapxf>.

¹ Tver State University, Professor (Tver, Russian Federation), mancu@mail.ru

² Central Black Earth Interregional Administration of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, Leading Specialist, Expert of the Department of State Environmental Supervision in the Voronezh region (Voronezh, Russian Federation), kulneff.vadim@yandex.ru

³ Kursk State University, Department of Geography, Professor (Kursk, Russian Federation), kumanim@yandex.ru

⁴ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Department of Real Estate Management and Territorial Development, Associate Professor (Moscow, Russian Federation), adn22@yandex.ru

⁵ All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova, Postgraduate Student (Moscow, Russian Federation), akbi@mail.ru

⁶ All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Head of the Department of Biodiversity, Forest Management and Forest Cultivation (Voronezh, Russian Federation), o.v.tregubov@gmail.com

⁷ Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Postgraduate Student (Voronezh, Russian Federation), slavapohvalenko@yandex.ru

⁸ All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Laboratory Assistant-Researcher of the Department of Forest Genetics and Biotechnology (Voronezh, Russian Federation), greenland.ld@yandex.ru

Введение

В настоящее время существует проблема уплотняющего воздействия, которое оказывают на почву транспортные средства высокой мощности и тоннажа, в том числе применяемые при санитарной рубке лесов. Многочисленные проходы такой техники существенно уплотняют почву и подстилающие породы, что, несомненно, приводит к снижению плодородия почв и ухудшению состояния грунтов зоны аэрации – подпочвенного слоя. На степень уплотнения субстрата также влияют климатические условия, годовое количество осадков, видовой состав лесных насаждений и другие факторы.

Вместе с тем излишнее уплотнение почв и грунтов зоны аэрации снижает их водопроницаемость и ограничивает доступ воздуха в корнеобитаемый слой, в результате чего ухудшаются условия произрастания леса, усиливается водная и ветровая эрозия, что приводит к росту материальных затрат на обработку субстрата.

Механическое рыхление почв и грунтов в настоящее время является наиболее эффективным приемом разуплотнения. Рабочий процесс разуплотнения верхнего слоя и «плужной подошвы» на глубину 3–15 см и 16–33 см достаточно подробно освещен в публикациях [1, 2]. Однако процедура разуплотнения более глубоких слоев почвы (33–120 см) на данный момент пока еще недостаточно обоснованна.

Следует отметить, что механическая обработка почв и грунтов имеет двойственный характер – структурообразующий и почворазрушающий. Результатами отвальной обработки субстрата плугами в некоторых случаях являются смыв и выдувание плодородного слоя, что ведет к эрозии и снижению плодородия почвенного покрова. Поэтому и при глубоком рыхлении необходимо использовать почвозащитные меры.

Цель исследования – повышение эффективности механической обработки субстрата при организации противопожарных минерализованных полос. Очевидно, что эффективность обработки определяется оптимальным сочетанием

характеристик почв и грунтов, режимов их обработки и особенностями конструкции рабочего органа. Поэтому основной задачей исследования является разработка динамических моделей разных конфигураций рабочих органов при различных режимах обработки как почв, так и грунтов.

Объекты исследований и методы

Образцы почвы (в виде монолитов) для проведения лабораторных экспериментов были отобраны на территории Бутурлиновского муниципального района Воронежской обл. Почва – тёмно-серая лесная, среднесуглинистая.

Исследования осуществлялись на основе фрактальных методов, ключевой характеристикой которых служит фрактальная размерность. Она показывает степень сложности, развитости структуры исследуемого объекта и является универсальной характеристикой, позволяющей сравнивать и оценивать структуру разнородных систем [3].

Поскольку изученные тёмно-серые лесные среднесуглинистые почвы представляют собой многоуровневые и сложноорганизованные структуры, то фрактальная размерность в количественном выражении показывает, насколько почвенная система упорядочена на различных уровнях своей организации. Обработка почвы может нарушать эту упорядоченность, изменяя исходную структуру. При этом различные способы обработки почвы оказывают разное влияние. В этом смысле можно говорить о связи технологий обработки почвы при прокладке противопожарных минерализованных полос с ее качеством.

Основным способом определения фрактальной размерности геометрических объектов на сегодня является классический «клеточный» способ, предложенный Бенуа Мандельбротом [4].

Для определения фрактальной размерности этим способом на объект накладывается серия сеток с шагом, изменяющимся от δ_{\max} до δ_{\min} . Наибольший размер клетки рекомендуется выбирать в пределах 0,10–0,05 общего размера объекта, δ_{\min} должен быть сопоставим по размеру

с минимальными составляющими объекта. Затем подсчитывают количество ячеек сетки, в которые попадают элементы объекта.

Фрактальная размерность определяется как тангенс угла наклона линии зависимости числа элементов структуры, попавших в ячейки сетки, от шага сетки в дважды логарифмических координатах. Ширина коридора ε – точность фрактальной модели. При этом степень линейной зависимости числа элементов от масштаба в дважды логарифмических координатах показывает, насколько самоподобной является изучаемая структура:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \left(\frac{1}{\delta} \right)}, \quad (1)$$

где:

D – фрактальная размерность объекта;

N – число элементов структуры, попавших в элементы сетки;

δ – шаг сетки.

Таким образом, для описания объекта фрактальными методами он должен обладать следующими признаками:

1) Объект слишком неоднороден для того, чтобы его описать средствами традиционной евклидовой геометрии с целочисленной размерностью.

2) Объект самоподобен, т.е. его геометрические и физические параметры связаны степенной зависимостью.

3) Фрактальная размерность объекта, как количественная характеристика меры его сложности, характеризующая плотность и равномерность заполнения элементами этого объекта евклидового пространства, должна быть всегда меньше размерности этого пространства.

Планирование экспериментов и обработка их результатов проводились на основе гипотезы о том, что изучаемый генетический тип почвы представляет собой неоднородную диссипативную систему с самоорганизованной критичностью состояний, которые закономерно изменяются в процессе внешнего воздействия.

Любые системы, полная энергия которых при движении убывает, переходя в другие формы (например, механическая энергия в теплоту, в изменение структуры), получили название диссипативных систем. Аналогично энергия, затрачиваемая на обработку грунта, идет не только на перемещение части плодородного слоя почвы, но и на разрушение, усложнение его структуры. Эту задачу выполняют в основном различного вида рыхлители, осуществляющие предварительную подготовку почвы, облегчая ее дальнейшую обработку или улучшая условия произрастания лесных насаждений.

Таким образом, в результате самоорганизации почвенная система приобретает свойства, ранее не присущие ее подсистемным элементам, демонстрируя сложное целостное поведение. Имеет место эффект самоорганизованной критичности диссипативной системы, отличительным признаком которого является проявление масштабной инвариантности (самоподобия) составляющих ее элементов.

В том случае когда проявление самоподобия структуры почвы утрачивается, происходят устойчивые процессы его разрушения, составляющие основу процессов рыхления. Например, диссипативные свойства субстрата выражаются в уплотнении грунта при достаточно сильной вибрации, в образовании «вязких пальцев» при фильтрации жидкости через почву, а также при поглощении энергии в процессе ее рыхления.

Экспериментальные исследования образцов почвы, в итоге подтвердившие принятую гипотезу, проведены в лабораторных условиях с использованием моделей рабочих органов объемных рыхлителей в грунтовом канале (рис. 1).

Начальные условия испытаний были следующими: температура в помещении +16...20 °С; относительная влажность воздуха – 40–50%; грунт в канале – суглинок плотностью 1,6 г/см³ и влажностью 8–10%.

Существенным условием точности проведения эксперимента являлось поддержание нормальной влажности грунта, поскольку она достаточно сильно может влиять на измеряемую величину. Для этого были проведены дополнительные

исследования влияния влажности грунта на его фрактальную размерность. В ходе исследования построена кривая такого распределения, чтобы уточнить диапазон поддержания нормальных параметров влажности (рис. 2).

Как видно на рис. 2, наблюдается практически линейный рост фрактальной размерности, начиная с относительно малых величин влажности (5–7%) до средних значений (13–15%).

Это объясняется положительным влиянием влажности на организацию самоподобных структур в грунте. При повышенной влажности (>18%) вода гомогенизирует почву. Поэтому в ходе эксперимента необходимо поддерживать относительную влажность субстрата около 10% [5]. Серии опытов проводили последовательно, в течение достаточно короткого времени, чтобы грунт существенно не изменил влажность.

Скорости перемещения рабочих органов, на которых проводили испытания, составили 0,20, 0,25 и 0,30 м/с. При этом тяговое усилие измеряли при помощи датчиков с записью результатов на жесткий диск компьютера. По конструкции рабочие органы моделей отличались формой (плуг и трехстоечный рыхлитель) и углом наклона режущих лезвий на концах стоек, который составлял 20, 25 и 30° по отношению к направлению движения рабочего органа.

В ходе исследований осуществляли срезы почвы с применением специально сконструированного устройства. Срезы субстрата маркировали и фотографировали для последующей фрактальной обработки, позволяющей получить количественные характеристики обработанного субстрата через фрактальные размерности его структурных составляющих.

Определение гранулометрического состава грунта в лабораторных условиях проводили по методике В.В. Охотина, приведенной в работе [6]. Для опытного определения фрактальной размерности среднесуглинистой тёмно-серой лесной почвы использовали плагин *fractal dimension* модульной программы визуализации и анализа данных «Gwyddion».

Фотофиксация срезов субстрата перед проведением экспериментов и во время их

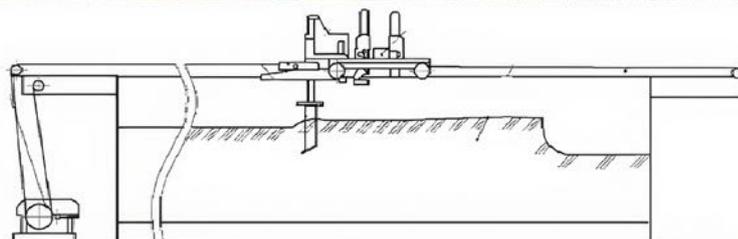


Рис. 1. Экспериментальный грунтовый канал и используемые модели рабочих органов

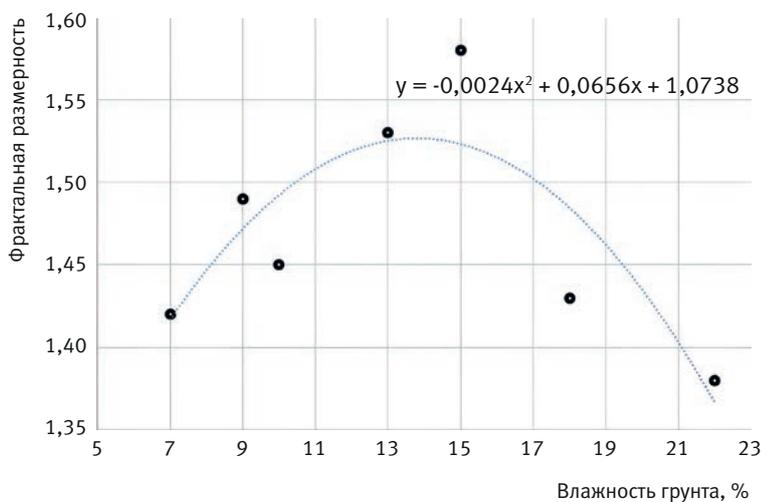


Рис. 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА

выполнения осуществлялась в высоком разрешении в формате .bmp. Данный вид формата использовали в силу того, что наиболее распространенный формат .jpeg вносит в изображение небольшие структурные искажения при его сжатии. Снимки приводили к черно-белому формату с разрешением 1 бит. После чего измеряли фрактальную размерность интересующих участков изображения.

В основе программного плагина *fractal dimension* используется распространенный клеточный метод оценки фрактальной размерности, который применительно к изображению среза почвы основан на подсчёте квадратов (кубов), покрывающих его изображение:

$$\text{Log}N(\epsilon) = -D \text{Log}(\epsilon), \quad (2)$$

где:

D – фрактальная размерность среза грунта;

N(ε) – число квадратов, покрывающих изображение среза грунта;

(ε) – варьируемый масштаб решетки покрытия.

В основе клеточного метода лежит следующий алгоритм: квадратная решетка с постоянной (ε) накладывается на расширенную по z поверхность изображения среза грунта. Изначально (ε) задаётся равной X/2 (где X – длина края

поверхности). Тогда N(ε) – число всех квадратов, содержащих хотя бы один пиксель изображения.

Постоянная решетки (ε) на каждом шаге уменьшается в 2 раза, и процесс повторяется до тех пор, пока (ε) не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон аппроксимирующей прямой, выделяющий область масштабной инвариантности изображения, позволяет определить фрактальную размерность исследуемого изображения почвенных образцов.

Результаты и обсуждение

Фрактальная размерность необработанной, равномерно увлажненной и утрамбованной тёмно-серой лесной среднесуглинистой почвы колебалась в пределах 1,42–1,6. Такой разброс значений указывает на относительную однородность опытного образца почвы, которая определяет его структуру в условиях, максимально приближенных к естественным.

При повышении скорости рабочего органа (плужного каналокопателя) наблюдается устойчивый нелинейный рост фрактальной размерности срезов субстрата. Начиная со скорости 0,27 м/с, происходит постепенное выравнивание фрактальных размерностей, что свидетельствует о достижении предела самоорганизации субстрата. В этом состоянии последствия нарушения его структуры не компенсируются перемещением, осыпанием и усадкой субстрата, как своеобразными процессами релаксации внесенных возмущений.

Таким образом, начиная с фрактальной размерности D = 1,8 самоорганизующаяся способность грунта утрачивается. Достигается баланс между степенью рыхления и тяговыми усилиями на рабочем органе (рис. 3).

Эпюры распределения фрактальных размерностей грунта, обработанного трехстоечным рыхлителем с различным углом наклона режущих пластин, представлены на рис. 4.

Оценка различных режимов обработки субстрата при увеличении угла режущей пластины показала, что рост тяговых усилий

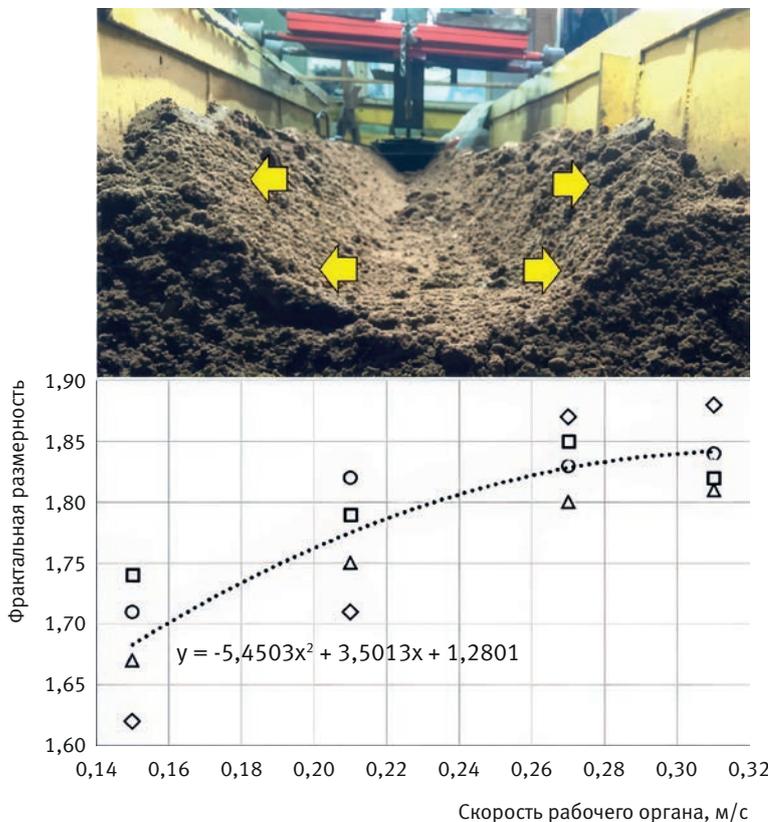


Рис. 3. Участки канала срезов грунта и зависимость фрактальной размерности от скорости перемещения рабочего органа

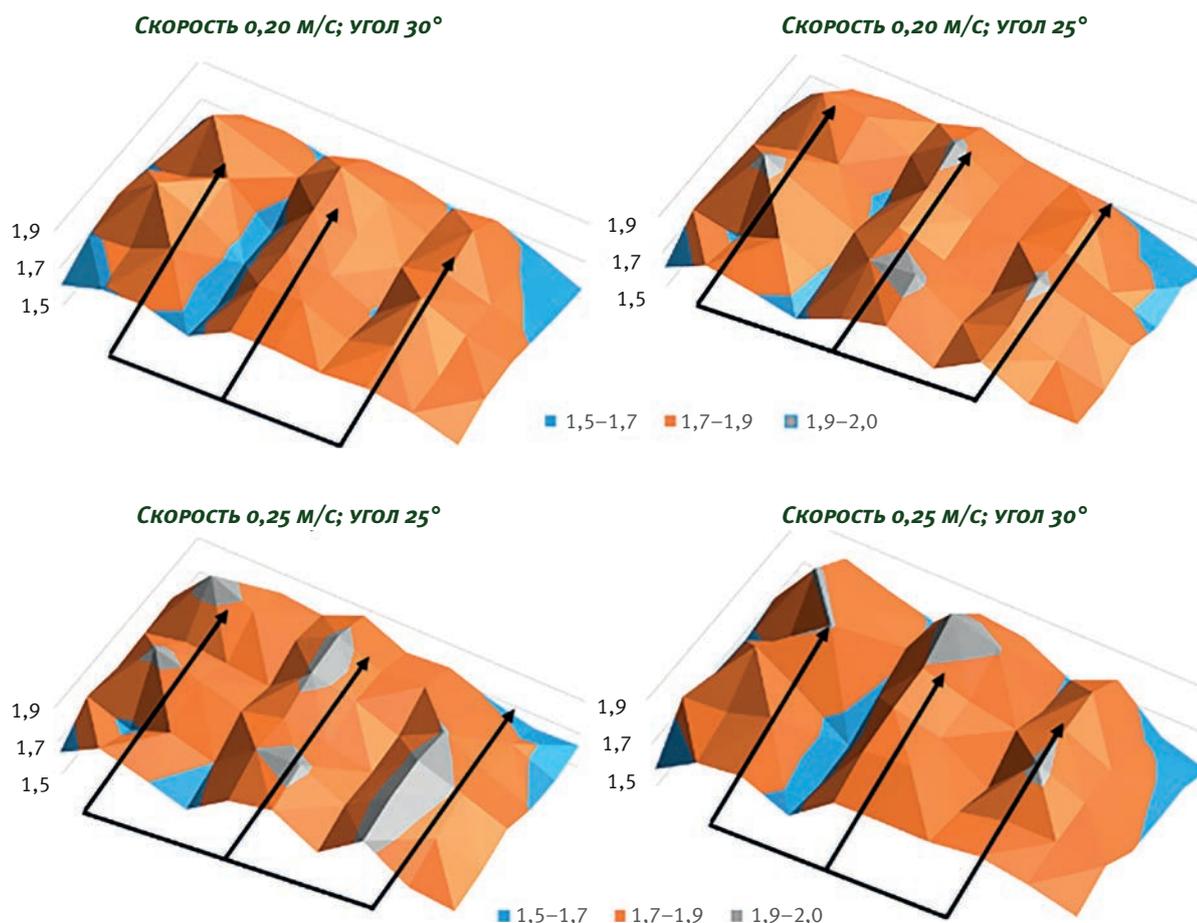


Рис. 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ ГРУНТА, ОБРАБОТАННОГО ТРЕХСТОЕЧНЫМ РЫХЛИТЕЛЕМ С РАЗЛИЧНЫМ УГЛОМ НАКЛОНА РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН

пропорционален увеличению скорости рыхления. Полученная зависимость практически линейна при малых скоростях, но с повышением скорости рыхления приобретает слабостепенной характер. Эта тенденция сохраняется в распределениях средних значений фрактальных размерностей по срезу субстрата для различных скоростей и конструкций трехстоечного рыхлителя (рис. 5). Усреднение фрактальных размерностей было осуществлено по результатам 60 измерений для каждого среза, поэтому они обладают высокой достоверностью.

Показано, что фрактальные размерности тесно связаны со структурой почвенных образцов, их гранулометрическим составом, пористостью, водопроницаемостью. В связи с этим увеличение фрактальной размерности свидетельствует об улучшении водно-физических свойств тёмно-серых лесных и любых других обрабатываемых

почв через оптимизирование их структуры и гранулометрического состава.

Новизна и рациональность предложенного метода оценки качества обработки почвы состоит в том, что вместо трудоемкой оценки плотности, пористости, водопроницаемости, гранулометрического состава, весьма изменчивых во времени и пространстве, предложен универсальный, при наличии современного оборудования, эффективный метод оценки динамики почвенной структуры в лабораторных и полевых экспериментах.

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что с ростом скорости обработки качество рыхления, выражаемое фрактальной размерностью для модели рыхлителя с углом наклона режущих пластин 20° , практически линейно растет пропорционально скорости. Для моделей с углами $25-30^\circ$ наблюдается уже

степенная зависимость с вероятным выходом на постоянное значение.

Отметим, что выход фрактальной размерности на постоянное значение означает, что между режимом обработки и типом обрабатываемого грунта может быть достигнут баланс энергетических затрат, обеспечивающий соответствующую

степень рыхления. Например, судя по рис. 5, такой баланс достигается при углах режущих пластин, составляющих как 20°, так и 30°, но последний вариант рабочего органа при той же скорости (0,25 м/с) обеспечивает более качественное рыхление.

С учетом усилия на рабочем органе наиболее оптимальным является рабочий орган трехстоечного рыхлителя с углом наклона режущих пластин 30° при скорости обработки около 0,25–0,28 м/с. При этом низкие скорости (<0,2 м/с) не обеспечивают высокой степени разрушения первоначальной структуры грунта.

Одним из параметров качества рыхления грунта является его объемная равномерность, обеспечиваемая, наряду со степенью рыхления, в различных режимах обработки. Для этого были рассчитаны дисперсии фрактальных размерностей по срезам грунта, соответствующие различным режимам обработки (рис. 6). Анализируя эти зависимости, можно сделать вывод, что наиболее равномерное распределение фрактальной размерности и, соответственно, рыхление грунта осуществляется на скорости 0,20–0,25 м/с. С увеличением скорости дисперсия ожидаемо увеличивается.

На эту закономерность также указывают коэффициенты корреляции между нормированными средними фрактальными размерностями срезов и тяговыми усилиями по диапазону скоростей:

Угол наклона режущей пластины, °	20	25	35
Коэффициент корреляции фрактальной размерности и тяговых усилий по диапазону скоростей	0,68	0,83	0,85

По динамике коэффициента корреляции можно сделать вывод, что наиболее равномерное рыхление субстрата достигается при угле наклона рабочих пластин рыхлителя 30°.

Таким образом, наиболее оптимальным рабочим органом, с конструкцией, обеспечивающей максимально высокое качество рыхления, оказался трехстоечный рыхлитель с углом наклона режущих пластин 30°, на скорости обработки

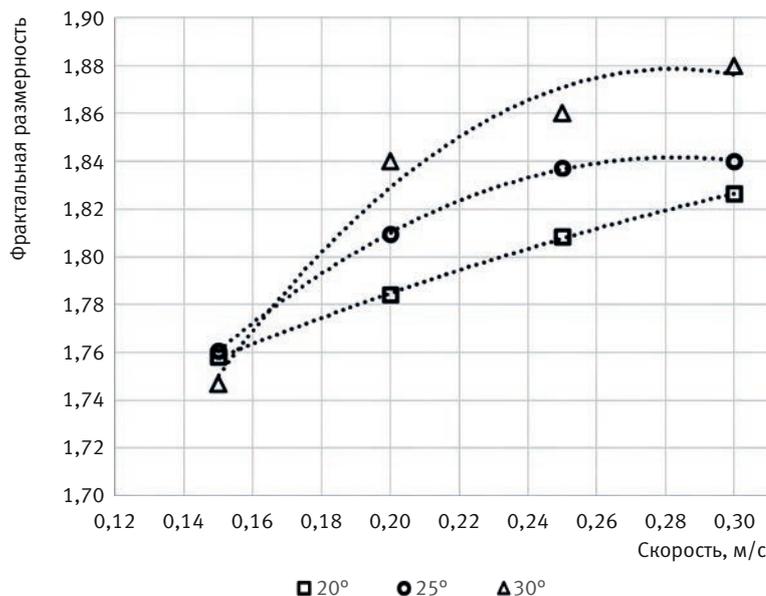


Рис. 5. УСРЕДНЕННЫЕ ФРАКТАЛЬНЫЕ РАЗМЕРНОСТИ ПО СРЕЗАМ ГРУНТА

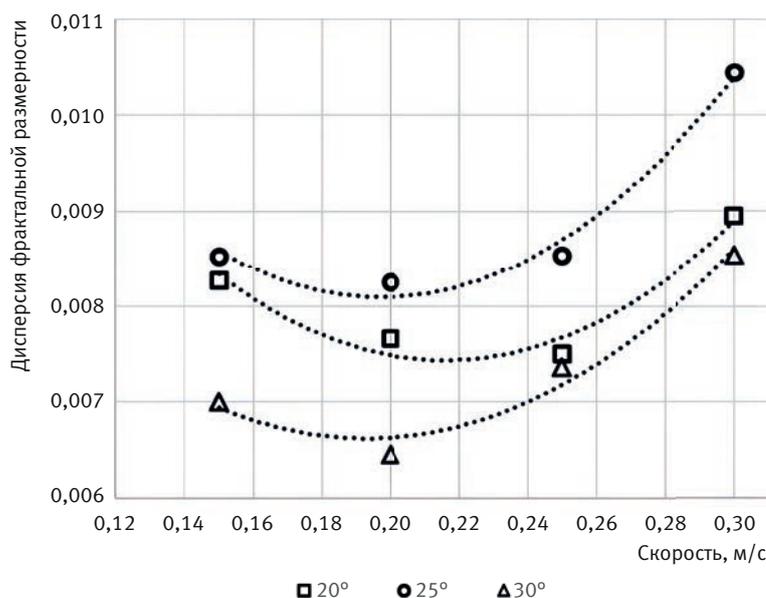


Рис. 6. ЗАВИСИМОСТЬ ДИСПЕРСИИ ФРАКТАЛЬНЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ ГРУНТА ДЛЯ ТРЕХСТОЕЧНЫХ РЫХЛИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ И СКОРОСТЕЙ ОБРАБОТКИ

0,25–0,27 м/с. При этих параметрах была обеспечена максимальная степень и равномерность рыхления экспериментального грунта, приближенного к естественному.

Выводы

1. Проведенные эксперименты подтвердили гипотезу о том, что почву в процессе ее обработки можно рассматривать как фрактальную самоподобную структуру, закономерно изменяемую внесенными возмущениями. Это означает, что, независимо от типа грунта, степень и равномерность его рыхления ограничена характером внешних воздействий, конструкцией рабочего органа, энергозатратами на его перемещение. При этом энергия обработки идет как на упорядочивание структуры почвы, так и на его рыхление. За упорядочивание структуры отвечают процессы самоорганизации – естественные процессы перемещения, осыпания и усадки субстрата после его обработки, которые имеют свои пределы. Если энергия обработки превосходит эти пределы, то начинают превалировать процессы разрушения структуры, которые носят необратимый характер. При этом эффективным показателем степени рыхления почвы является фрактальная размерность, оценивающая меру развитости его структуры.

2. Эмпирический этап исследования непосредственно связан с предварительной подготовкой почвы. Фрактальная размерность необработанного, равномерно увлажненного

и утрамбованного экспериментального субстрата колебалась в пределах 1,42–1,6. В ходе подготовки субстрата дополнительно изучено влияние влажности субстрата на его фрактальную размерность. Сделан вывод о том, что наблюдается практически линейный рост фрактальной размерности, начиная с относительно малых величин влажности (5–7%) до средних значений (13–15%). Это объясняется положительным влиянием воды на организацию самоподобных структур в указанной почве, в то время как при повышенной влажности (>18%) субстрат гомогенизируется. Поэтому в ходе экспериментов начальные параметры подготовленного субстрата поддерживались на уровне: фрактальная размерность – 1,42–1,6, относительная влажность – 8–10%. Отметим, что в естественных условиях проведения эксперимента предварительная подготовка почв не требуется [1, 6].

3. Наиболее оптимальным рабочим органом, конструкция которого обеспечивает максимально высокое качество рыхления субстрата, оказался трехстоечный рыхлитель с углом наклона режущих пластин 30° со скоростью обработки 0,25–0,27 м/с. При этих параметрах на экспериментальном субстрате была обеспечена максимальная степень и равномерность рыхления. Для других конструкций при этих энергетических затратах степень и равномерность рыхления заметно снижаются. На низких скоростях обработки субстрата (менее 0,20 м/с) ни одна конструкция не обеспечивает максимальную степень рыхления, т.е. качество процесса.

Список источников

1. Обоснование основных параметров рабочих органов для глубокого послойного рыхления почв / Н.Д. Лепешкин, А.Н. Юрин, Н.С. Высоцкая [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства : Межведомственный тематический сборник. – Минск, 2011. – С. 65–71.
2. Сыромятников, Ю.Н. Исследование процесса работы экспериментального культиватора для сплошной обработки почвы. – Текст : электронный / Ю.Н. Сыромятников // Экономика: экономика и сельское хозяйство : Электронный научный журнал. – Нижний Новгород, 2018. – № 4 (28).
3. Фракталы в науках о Земле : учебное пособие / А.Н. Насонов, И.В. Цветков, И.М. Жогин [и др.]. – Воронеж : Ковчег, 2018. – 182 с.
4. Mandelbrot, Benoit B. The (mis)Behavior of Markets: A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward / Benoit B. Mandelbrot, Richard L. Hudson. – Basic Books, 2017.
5. Оценка зависимости фрактальных параметров грунта от его влажности / И.М. Жогин, М.М. Камалов, А.Н. Насонов [и др.] // Основные результаты научных исследований института за 2017 год : сборник научных трудов. – Москва, 2018. – С. 341–347.
6. Анализ влияния крупного металлургического предприятия на экологическое состояние приповерхностных отложений / Е.М. Репина, В.В. Кульнев, И.И. Косинова // Геологи XXI века : материалы VI Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. – Саратов : изд-во СО ЕАГО, 2005. – С. 129–130.
7. Моделирование режимов работы объемного рыхлителя методом фрактального анализа / И.В. Цветков, Ю.П. Леонтьев, И.М. Жогин [и др.] // Доклады ТСХА : материалы международной научной конференции. – Тверь, 2018. – С. 154–156.

References

1. Obosnovanie osnovnyh parametrov rabochih organov dlya glubokogo poslojnogo ryhleniya pochv / N.D. Lepeshkin, A.N. Yurin, N.S. Vysockaya [i dr.] // Mekhanizaciya i elektrifikaciya sel'skogo hozyajstva : Mezhhvedomstvennyj tematicheskij sbornik. – Minsk, 2011. – S. 65–71.
2. Syromyatnikov, Yu.N. Issledovanie processa raboty eksperimental'nogo kul'tivatora dlya sploshnoj obrabotki pochvy. – Tekst : elektronnyj / Yu.N. Syromyatnikov // Aekonomika: ekonomika i sel'skoe hozyajstvo : Elektronnyj nauchnyj zhurnal. – Nizhnij Novgorod, 2018. – № 4 (28).
3. Fraktaly v naukah o Zemle : uchebnoe posobie / A.N. Nasonov, I.V. Cvetkov, I.M. Zhogin [i dr.]. – Voronezh : Kovcheg, 2018. – 182 s.
4. Mandelbrot, Benoit B. The (mis)Behavior of Markets: A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward / Benoit B. Mandelbrot, Richard L. Hudson. – Basic Books, 2017.
5. Ocenka zavisimosti fraktal'nyh parametrov grunta ot ego vlazhnosti / I.M. Zhogin, M.M. Kamalov, A.N. Nasonov [i dr.] // Osnovnye rezul'taty nauchnyh issledovanij instituta za 2017 god : sbornik nauchnyh trudov. – Moskva, 2018. – S. 341–347.
6. Analiz vliyaniya krupnogo metallurgicheskogo predpriyatiya na ekologicheskoe sostoyanie pripoverhnostnyh otlozhenij / E.M. Repina, V.V. Kul'nev, I.I. Kosinova // Geologi XXI veka : materialy VI Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh specialistov. – Saratov : izd-vo SO EAGO, 2005. – S. 129–130.
7. Modelirovanie rezhimov raboty ob'emnogo ryhlitelya metodom fraktal'nogo analiza / I.V. Cvetkov, Yu.P. Leont'ev, I.M. Zhogin [i dr.] // Doklady TSHA : materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. – Tver', 2018. – S. 154–156.